

# 回転系を体感する方法の検討

中村 健治

## 要旨

大気・海洋の地球規模の現象には地球回転の影響が強く現れる。回転系上の現象は直感的には理解することが難しい。回転系上で現れるコリオリ力などを体験する方法について検討した。まず角運動量の保存を体験するために回転台の上で手を伸び縮みさせる。この時、コリオリ力により本人の回転が速くなる。次に回転台の上で車輪を回し、車輪の回転面を変化させる。すると車輪を持っている本人回転が変わる。さらに回転流体では上下運動が抑制されるが、これを示す実験方法として上下2枚の面内で回転するひもでつながれた分銅とひもの中間に取り付けられた重りを考えた。この場合、二つの分銅を回転させてから分銅を動かすと復元力を感じるようになる。これらの実験は大気・海洋の現象を理解する基礎体験を与えることが期待される。

## 1 はじめに

今日、環境問題は国境を越え、地球環境問題となっている。このような問題に対処するためにはまず科学的知見を持つ必要がある。社会の中での実際の意思決定は様々な利害得失、環境条件、歴史等が複雑に関わる、すぐれて人間的なことである。そしてその決定には多くの異論のあることが通常である。意思決定に当たってはその基礎資料として科学的知見が必要である。また科学的知見に関しては多くの人の理解と同意が得られ易い。しかしこのためには人々の地球システムへの理解が必要である。環境共生研究所においては自然環境システムの一般への理解を深める方法も視野に入れる必要があろう。

大気と海洋の地球規模の運動には地球が回転していることが大きく影響している。地球はもちろん1日で1回転するが、地球上の現象の時間スケールが1日以

上ある場合にはその現象は地球回転の影響を大きく受ける。この地球回転の影響を実際に感じることは困難である。しかし、回転系を実感する試みは科学博物館のようなところでいろいろとなされている。本稿では回転系について教科書では結果は記されているが理解しにくいいくつかの事について実感としての理解への助けとなりそうな考えを記すとともに、回転系を実感するアイデアを考えてみる。これはまた一般の人に大气や海洋の大規模な現象の基礎を伝える試みでもある。

## 2 大気現象、海洋現象と地球の回転

日本では低気圧が西から来るとそれに伴う前線により雨が降る。低気圧はその水平規模は数千kmで、またその時間スケールは数日以上あるために地球の回転の影響を強く受ける。天気図でよく知られているように、等圧線に沿って風が吹く。非回転系では高圧部から低圧部へ風が流れるが、高低気圧の現象では風は等圧線に沿って流れ、低圧部へ直接には流れ込まない。地球上で地球とともに動いていると地球の回転は意識されないが、低気圧の上昇流や台風の上昇流のように大気が集まる（収束する）とバックグランドにある地球回転が表に現れてくる。フィギュアスケートで選手がスピンする時、手を縮めるとスピンが速くなることと同じであるが、地球上では地球の回転は直接には見られないので、収束・発散があると何も無いところから渦が発生してくるように見える。

地球回転の影響には遠心力とコリオリ力の2種類がある。慣性系での運動方程式を回転系での運動方程式に書き換えると遠心力とコリオリ力は自動的に現れてくるが、前者は分かり易いものの後者には分かりにくい面がある。

海洋には海流がある。世界の2大暖流として赤道域

から高緯度へ流れる黒潮とメキシコ湾流がある。両者とも大洋の西側にある大陸に張り付くように流れており、西岸強化流とも呼ばれる。この現象は地球が回転していることと地球が丸いことに起因している。これもまた人々の日常からはすぐには実感しにくい現象である。これらの例のように一見不思議な現象が回転系では生じる。

### 3 角運動量を実感する

回転系を考える前に角運動量を実感することを考えてみよう。フィギュアスケーターのスピンを実感するために、回転台（ターンテーブル）を使う。これを丸椅子の上に載せ、その上に座ると楽に回転できる代物である。この上に座って手を横に伸ばして回転する。この時、手には辞書など少し重いものを持つと良い。回っている状態で手を縮めると自分の回転が若干速くなる。手を縮める時、手が回転している方向に引っ張られ、それにより回転が速くなるように感じる。逆に手を縮めた状態から広げると自分の回転は遅くなる。これは手を伸ばすときに伸ばし難くなるためであるが、これは理由は不明だが実感があまり伴わない。学生にも実験台として試してもらったところ、感じる学生はすぐに感じるが、目が回る、とのことで感じるには至らない学生もいた。

次に回転実験用の車輪を使った体感実験を試みる（図1）。これは自転車の車輪とよく似ているが左右に伸びた軸を手にとってコマのジャイロ効果を実感できるようにした高校物理実験機材の一つであり、科学館などで目にすることができる。車輪の軸を持った両腕を水平に伸ばし車輪を鉛直面内で回転させる。そしてその軸を回して車輪の回転面が鉛直になるようにする。



図1 角運動量の移動を体感する簡単な実験の模式図

するとコマの回転軸を変化させることと同じで直角方向に力を感じる。具体的には片方の手が押され、もう片方の手が引っ張られる。次に回転台の座った状態で同じことを行う。すると直角方向に働く力により回転台に乗った自分が回転しようとする。これはもともとは鉛直軸の周りの角運動量はゼロであったものが、車輪の回転面を変化させて水平に、つまり回転軸を鉛直にすることにより鉛直軸についての車輪の角運動量が現れ、これに対応してそれを支えている自分が逆方向に回りだして、鉛直軸の周りの角運動量（角運動量の鉛直成分）の総計がゼロに保たれることと理解される。少し変えて、少しやりにくいが最初は車輪の軸が鉛直に、つまり車輪の回転面が水平になるように持って車輪を回転させておいてから、車輪の軸を水平にすると、今度は回転台に乗っている自分が車輪の回転と同じ方向に回転しだす。これも鉛直軸に対する角運動量を一定に保つことの現れであるが、力を体感することにより角運動量が車輪から自分に移動することを実感できる。なお、これは科学館のようなところでやっていると思われる。

### 4 西岸強化流

西岸強化流は黒潮やメキシコ湾流のように大陸の東側で生じる強い海流である。太平洋や大西洋では低緯度域では大気下層の貿易風により海水は東から西へ、中高緯度では西風により海水は西から東に流れる。その結果として太平洋、大西洋の北半球側では時計回りの海流が存在する。それだけならば特に大陸の東側で強い流れが生じるとは思えないが、実際には大陸の東側で強い流れが生じる。これは地球流体力学の分野でベータ（ $\beta$ ）効果と呼ばれる現象に依っている。ベータ効果とは地球表面で渦が南北に移動すると余分な渦度が現れる現象である。低緯度域では地球回転の軸は水平に近いので水平流にはその効果は現れない。しかし、渦が高緯度に移動すると地球回転の影響が現れる。というより、地面が回転し始めるのでその上にある海流が地球回転とは逆の回転を示すようになる。北半球低緯度の海水が北に進むと左回転する地球上で見ると海水は右回転しようとする。このため北に進む海

流は進む方向の左側の速度が大きくなる。こうして西岸強化流が発生する（図2）。

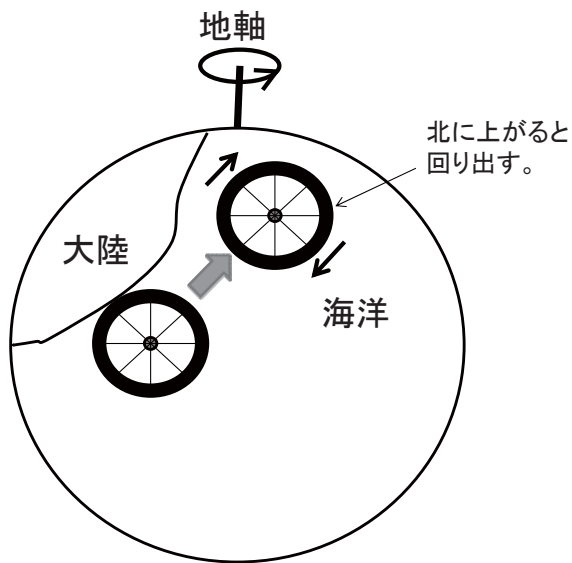


図2 西岸強化流の模式図。赤道にあった「車輪」が北に上がると地球に対しては右回りに回転し始める

もう少し加えよう。赤道域から北に移動しようとする海水は小さい絶対渦度しか持っていないが、左側に大陸があるため地球の回転に合わせて流れようとする。いわば渦無しの流体が曲がった樋を流れようとしていることに相当する（図3）。この時、流体は樋に合わせて曲がるが、内部の渦無し状態を保つためには曲がる内側が速く、外側は遅く流れなくてはならない。この内側の速い流れが西岸強化流に相当している。なお、なぜ内側の流れの速度が大きくなるかについては、曲がるためには内側は圧力が低く、外側は圧力が高くないといけないが、内側の曲がり点に近づく流体は曲がり点付近の圧力が低いために加速されるから、と理解される。実際の流れでは壁には粘性があるので、壁

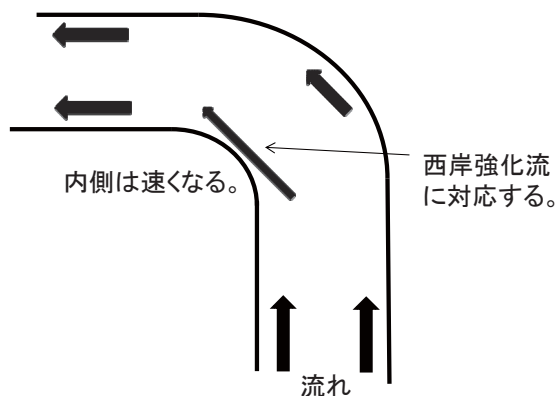


図3 渦無しの流れ曲がった樋を流れる時の速度の分布の模式図。

際には速度は遅くなる。西岸強化流でも大陸のそばでは大陸による抵抗のために速度は遅くなっている。

上の説明では渦が南北に移動するときはその渦の大きさを保って移動するとしている。これは正しいであろうか。流体力学における渦度の保存からは低緯度域での渦では軸が地軸から直角方向にあったが、渦が北に移動すると渦の軸が地軸に近づくように傾いてくる。このため水平の渦の大きさは変化すると思われる。ところが地球表面ではこのことは起こらない。これはなぜであろうか。回転する車輪を持っている状態を再度考えてみよう。最初は回転面が鉛直面内にあるように持つ。これは赤道域で地球表面に沿った渦を想定している。次に車輪の軸を傾けてみよう。すると傾けようとする方向に対して直角方向に力が働く。これに対抗するように力を与えながら回転軸を傾けると車輪の回転面は水平面に近づくが、回転軸方向のトルク成分はないので、この場合回転の速度そのものは変化しない。これと同じことが地球表面の海流にも起こっている。海の渦が南北に移動すると渦を東西に傾けようとする力（トルクの水平南北方向の成分）が現れる。ところが海では海表面があるため海の東西の片側が上がり、反対側が下がることにより、そのトルクを打ち消す。大気では自由表面は無いが、温位と呼ばれる実質的な気温は上空ほど高いため、大気は基本的には安定しており、渦の片側が若干盛り上がることによりトルクを打ち消している。これにより地球表面の水平渦が南北に移動したとき、渦度の大きさは保たれることになる。関連して、地球流体力学では、基本方程式を導くときに、水平流に影響を及ぼすコリオリ力の鉛直成分は重要視するが、鉛直面内の渦に寄与するコリオリ力の水平成分は重力あるいは重力による浮力に比べて弱いとして無視する。オーダー計算からこのことは正当化されているが、このことにより渦度は鉛直成分のみが表に現れている。

この西岸強化流を体感することはできるだろうか。一つのアイディアとして大陸と海洋を色分けして描いた大きな半球を上から見て左回転させて、本人も半球と一緒に回転しながら半球の表面に沿って車輪を上（北）に動かすことが考えられる。すると車輪が右回

転を始めるが、車輪に触ればその力を感じることができであろう。

## 5 回転系上の力学とコリオリ力

回転系で現れるコリオリ力は分かりにくい概念である。まず回転系での運動方程式を復習しておく。コリオリ力は古典力学の教科書ならばどのような本でも載っているが（例えば戸田、1982）、以下は Holton (1992) による。小倉(1978)にも同じ導出が載っている。もう少し丁寧な説明が栗原宣夫 (1979) にある。

簡単のため、平面部分のみを記す。ベクトル  $\mathbf{A}$  は角速度  $\Omega$  で回転する座標での基底ベクトル  $\mathbf{i}', \mathbf{j}'$  により

$$\mathbf{A} = A_x \mathbf{i}' + A_y \mathbf{j}'$$

と表される。鉛直の角速度  $\Omega$  で回転する系では  $\mathbf{i}', \mathbf{j}'$  も変化するので時間を  $t$  として

$$\begin{aligned} \frac{D\mathbf{A}}{Dt} &= \frac{D}{Dt}(A_x \mathbf{i}' + A_y \mathbf{j}') \\ &= \frac{DA_x}{Dt} \mathbf{i}' + \frac{DA_y}{Dt} \mathbf{j}' + A_x \frac{D\mathbf{i}'}{Dt} + A_y \frac{D\mathbf{j}'}{Dt} \end{aligned}$$

であり、

$$\left(\frac{D}{Dt}\right)_r = \frac{DA_x}{Dt} \mathbf{i}' + \frac{DA_y}{Dt} \mathbf{j}'$$

と定義すれば、

$$\begin{aligned} \frac{D\mathbf{i}'}{Dt} &= \Omega \mathbf{j}' \\ \frac{D\mathbf{j}'}{Dt} &= -\Omega \mathbf{i}' \end{aligned}$$

から

$$\left(\frac{D}{Dt}\right)_a \mathbf{A} = \left(\frac{D}{Dt}\right)_r \mathbf{A} + \Omega \times \mathbf{A}$$

となる。ここで添字 a, r は慣性系と回転系を示す。 $\mathbf{A}$  に位置  $\mathbf{r}$  を当てはめれば

$$\mathbf{v}_a = \mathbf{v}_r + \Omega \times \mathbf{r}$$

となる。再度時間微分を行えば

$$\begin{aligned} \left(\frac{D}{Dt}\right)_a \mathbf{v}_a &= \left(\frac{D}{Dt}\right)_r (\mathbf{v}_r + \Omega \times \mathbf{r}) + \Omega \times (\mathbf{v}_r + \Omega \times \mathbf{r}) \\ &= \left(\frac{D}{Dt}\right)_r \mathbf{v}_r + 2\Omega \times \mathbf{v}_r + \Omega \times (\Omega \times \mathbf{r}) \\ &= \left(\frac{D}{Dt}\right)_r \mathbf{v}_r + 2\Omega \times \mathbf{v}_r - \Omega^2 \mathbf{r} \end{aligned}$$

となる。新たに加わった項は右辺第二項の Coriolis 力と第三項の遠心力である。遠心力は場所にのみ依存する力でありポテンシャル  $-r^2 \Omega^2 / 2$  として重力  $\mathbf{g}$  に取り込むと、慣性座標と同様になり、重力の方向とその強さが場所により少し異なる効果となる。Coriolis 力は運動に伴う力でありこれは外力の形で残すしかない。

なお、回転系で静止している物体は求心力が働かなくてはならない。そして回転系上で慣性系のつもりになって考えるとその物体は静止しているから求心力にバランスする何らかの力が必要となる。この力は実際は物体は回転に伴っているために発生しているように見える力である。この場合、求心力は実際の力であり、それにバランスする遠心力はみかけの力となっている。もう少し言うと、遠心力は自らが加速度運動を行うために感じる力であり、外力ではなくいわゆる慣性力である。回転系の中にいる場合を想像すれば、他との相対位置は変わらないから自らが加速度運動をしていることは直接には分らない。それが遠心力として外力のように感じられるだけである。回転系を普通に想像するとどうしても慣性系と混じってしまう。回転系を想像すると、モーター音や回転に伴う振動で回転していることを力とは別のところから感知してしまうためだろう。そこで非常に静かに回転している円盤の上でいろいろの物体とともに乗っている状態を思い浮かべれば「不思議な」外力が働いていると感ずるであろう。この回転系の中で走ると横から誰か押しているように感じる筈である。また目標物へ走ろうとしても横に押されるのでうまくたどり着けない。これは慣性系で考えれば目標物がどんどん逃げていってしまうから、とも言える。ついでに言えば、目標物にうまく到達するためには一見遠回りとなるような迂回路をとらなければならない。

なお地球上の現象では水平面は引力と遠心力の和から決定されているので、水平面内の運動では遠心力の項を無視して

$$\left(\frac{D}{Dt}\right)_a \mathbf{v}_a = \left(\frac{D}{Dt}\right)_r \mathbf{v}_r + 2\Omega \times \mathbf{v}_r$$

とされる。



## 6 Foucault の振り子

Foucault (1819-1868) の振り子はひもが長くゆっくりと振動する振り子の振動面が少しずつ回転するのであり、地球回転を実際に見せる実験として科学博物館などでみることができる。また高校物理教材としても模型がある。慣性座標上では単純な振動であるから回転座標系ではその振動面が単純に  $\Omega$  で回転する筈である。

振り子の式は位置を  $(x, y)$  として、前節の最後に示したように遠心力は重力に含めてしまい水平面と鉛直軸を考えることにより

$$\begin{aligned}\ddot{x} - 2\Omega\dot{y} &= -\omega_0^2 x \\ \ddot{y} + 2\Omega\dot{x} &= -\omega_0^2 y\end{aligned}$$

となる。ここで振り子の重りの質量は 1 としている。また  $\omega_0$  は振り子の角振動数である。これを解くために

$$\zeta = \ddot{x} + i\ddot{y} = u + iv$$

とすると

$$\ddot{\zeta} + 2i\Omega\dot{\zeta} = -\omega_0^2 \zeta$$

となる。なおこのやり方は大気力学や海洋力学で良く知られている Ekman spiral を求める時のやり方と同じである (小倉, 1978)。これから  $\exp(at)$  の形の解が考えられ、

$$\alpha^2 + 2i\Omega\alpha + \omega_0^2 = 0$$

から

$$\alpha = -i\Omega \pm i\sqrt{\Omega^2 + \omega_0^2}$$

となるので

$$\zeta = \exp(i\Omega t) [A \exp(i\omega' t) + B \exp(-i\omega' t)]$$

となる。ここで  $A, B$  は複素数で時間的に一定、また

$$\omega' = \sqrt{\Omega^2 + \omega_0^2}$$

である。これは  $\Omega$  で回転する楕円運動を表している。また、ここで  $A = B$  とすれば

$$\begin{aligned}x &= A \cos(\Omega t) \cos(\omega' t) \\ y &= A \sin(\Omega t) \sin(\omega' t)\end{aligned}$$

と、中心を通り、振動面が  $\Omega$  で回転する Foucault の振り子が得られる。なお振り子の振動数は  $\omega'$  であり  $\omega_0$  ではなくってしまっている。これは次に述べるように遠心力を無視しているためである。

ここで振り子の長さが非常に長いとしてみよう。もっとも地球上で考えるとひもの長さは地球直径よりずっと長くしなければならなくなり、考えにくいがここでは回転実験室を想像することにしよう。すると  $\omega_0$  は  $\Omega$  に比べて小さくなり、静止解か  $\exp(2i\Omega t)$  の解となる。これは一見不思議である。なぜ  $\exp(i\Omega t)$  ではないのだろうか。回転座標系の式にもどってみよう。回転座標系での外力  $F$  のもとでの質点の運動方程式は位置ベクトルを  $r$  として

$$\ddot{r} - 2\Omega \times \dot{r} = F + \Omega^2 r$$

である。元の式は通常遠心力は重力に含めてしまい露わには示さない形となっているが、露わに示せば

$$\begin{aligned}\ddot{x} - 2\Omega\dot{y} &= -\omega_0^2 x + \Omega^2 x \\ \ddot{y} + 2\Omega\dot{x} &= -\omega_0^2 y + \Omega^2 y\end{aligned}$$

となり、元の式で  $\omega_0^2 \rightarrow \omega_0^2 - \Omega^2$  としたものとなっている。すると解は  $\exp(i\Omega t)$  の形となり、前と同様に角速度  $\Omega$  で回転する解となる。また遠心力を含めた系で前の計算を再度やってみると  $\omega' = \omega_0$  となる。

振り返って元の式でなぜ遠心力を無視したかを考えると、遠心力を重力に含めた geoid 上 (水平面上) で考えたからであり、湾曲している geoid 上では geoid に沿う運動からもとの重力と束縛力との合力により求心力  $-\Omega^2 r$  を得ているからである。質点はいわば geoid のお椀の中にあって中心力を得て重力を効かなくしているのである。このように地球上で遠心力を重力に含めることは時に誤解を招くことになる。このことは古くから知られているように思えるが、認識されたのは意外と最近である (Durran, 1993)。

Foucault の振り子の振動面が回転することは振り子がコリオリ力により横に曲げられるためである。こ

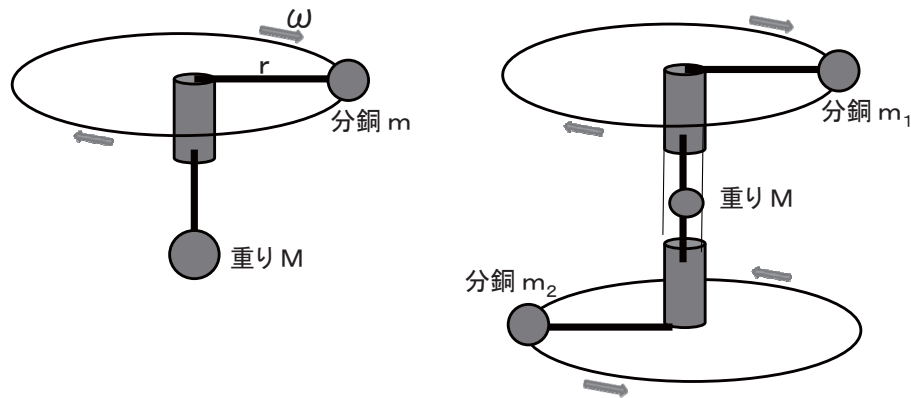


図4 回転分銅の実験の模式図。左：一つに分銅を回転させる。右：二つに分銅を回転させる。

れを体感できるだろうか。前のように回転台に乗り振り子をぶら下げて振動させれば振動の回転面が動くことは簡単に確かめられる。しかしこれでは体感していない。体感するためには手に何か重いものを持って揺らすと良い。すると動かす方向に直角方向の力を感じる。実はこれが回転している時に手を縮めると手が引っ張られ自分の回転が速くなることにつながっている。このようにして本人の回転が速くなるのはコリオリ力によっているといえる。

## 7 回転流体の特徴の一つの例

回転系では上昇下降流が抑制される。これは円筒形の中においた浮き子が何も無ければすぐに浮いてしまうが、全体を回転させるとすぐには浮いてこない実験で示される。これは浮き子が上下に動くためには周りの流体を上下に動かさなくてはならない。そうすると流体が水平に広がる、あるいは集まる動き(発散・収束)が生じるが、そうすると渦が生じて発散・収束が妨げられるためである。このように回転系では上昇下降流が生じにくいことを実感することを助けるために簡単な例を考えてみよう。質量  $m$  の分銅を半径  $r$ 、角速度  $\omega$  でぐるぐると回しているとしよう(図4左)。分銅をつなぎ止めている力はひもについている重り  $M$  によっているとする。遠心力  $F$  と重りの重力がバランスしていることから、

$$F = mr\omega^2 = Mg$$

である。次にこの分銅のひもをゆっくりと  $\delta r$  だけ縮めようとするとき遠心力があるために力が必要である。

ここでゆっくりと、としたのは、動径方向の運動は無視したいためである。回転系では角運動量保存から

$$\delta(r^2\omega) = 0$$

から

$$\delta\omega = -\frac{2\omega}{r}\delta r$$

となる。一方、運動エネルギー  $KE$  の変化分は

$$dKE = d\left(\frac{1}{2}mr^2\omega^2\right) = -r\omega^2 dr$$

であり、ひもを縮める時は  $dr$  は負であることに注意して、与えた仕事量  $W$  は

$$W = Fdr = -mr\omega^2 dr$$

と当然ながら一致する。この時重りは少し下がるわけで、その位置のエネルギーが分銅の回転エネルギーに変わったともいえる。

この例をもう少し拡張しよう。二つに分銅がひもでつながれていて回転しているとする。それぞれの質量、回転角速度、回転半径を  $m_1, m_2, \omega_1, \omega_2, r_1, r_2$  とする(図4右)。初期状態ではバランスしているとするとき遠心力  $F$  による張力は等しくなるので、

$$F_1 = F_2 = F_0 = m_1 r_1 \omega_1^2 = m_2 r_2 \omega_2^2$$

となる。ここでひもが上下して、それぞれの回転半径が  $\Delta r, -\Delta r$  だけゆっくり変化したとすると角運動量保存から

$$\begin{aligned} r_1^2 \omega &= (r_1 + \Delta r)^2 (\omega_1 + \Delta \omega_1) \\ r_2^2 \omega &= (r_2 - \Delta r)^2 (\omega_2 + \Delta \omega_2) \end{aligned}$$

となる。またそれぞれの遠心力は

$$\begin{aligned} F'_1 &= m_1(r_1 + \Delta r)(\omega_1 + \Delta\omega_1)^2 \\ &= m_1(r_1 + \Delta r) \left\{ \frac{r_1^2 \omega_1}{(r_1 + \Delta r)^2} \right\}^2 \\ &= F_0 \left\{ \frac{r_1}{r_1 + \Delta r} \right\}^3 \\ F'_2 &= m_2(r_2 + \Delta r)(\omega_2 + \Delta\omega)^2 \\ &= m_2(r_2 - \Delta r) \left\{ \frac{r_2^2 \omega_2}{(r_2 - \Delta r)^2} \right\}^2 \\ &= F_0 \left\{ \frac{r_2}{r_2 - \Delta r} \right\}^3 \end{aligned}$$

となる。

これから遠心力の差（アンバランス量） $\Delta F$ は

$$F = F'_1 - F'_2 = F_0 \left[ \left\{ \frac{r_1}{r_1 + \Delta r_1} \right\}^3 - \left\{ \frac{r_2}{r_2 - \Delta r} \right\}^3 \right]$$

となる。近似すれば

$$F \approx -3F_0 \Delta r \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

となる。これからひもの長さの変化量に比例してもとに戻そうとする力がかかることが分かる。もう少し簡単に  $r_1 = r_2$  の場合には

$$F \approx -6F_0 \left( \frac{\Delta r}{r_1} \right)$$

となる。上で、ひもの長さはゆっくり変化させる、としたが、これは回転の時間スケールに比べて変化の時間スケールが長いということであり、大気力学で地球回転の時間に比べてゆっくりな現象に適用される準地衡風近似と呼ばれる近似の成り立つ条件に対応している。この  $r_1 = r_2$ 、 $m_1 = m_2 = m$  の場合をもう少し拡張して、二つの分銅をつないでいるひもの途中に質量  $M$  の重りがついている場合を考えよう。この場合、釣り合いの式は、

$$F_1 = mr\omega_1^2 = F_2 + gM = mr\omega_2^2 + gM$$

となる。これから

$$\omega_1 = \sqrt{\omega_2^2 + g \frac{M}{mr}}$$

となる。これは重りにより上の分銅の回る速度と下の分銅の回る速度が異なることを示す。

ここで  $F_1 \gg gM$  とすると

$$\omega_1 = \omega_2 + \frac{gM}{2mr\omega_2}$$

あるいは

$$v_1 = v_2 + \frac{gM}{2m\omega}$$

となる。これは大気力学で、地衡風近似のもとで気温の水平傾度と風の高度のよる差とを結びつける温度風と呼ばれる関係に相当する。

この時、ひもの中間の重りを上下に動かすと復元力を感じる筈である。実際にこのような模型を作るとは可能であろうが、回転する部分と手に持つ固定部分とをつなぐやり方などで少し工夫が必要であろう。回転する流体の中に重りを落とすと回転していない場合よりもゆっくりと沈む筈であり、これは簡単に実験が可能であろう。

## 8 おわりに

回転系を体感する試みについて述べた。回転系では遠心力とコリオリ力が現れ日常の直感と異なることが起きる。遠心力は分かり易いが、コリオリ力は分かりにくい。通常のコリオリ力の実験は回転する台の少し上を物体を直線で動かすと台の上に残る軌跡が曲がるというものである。この場合はコリオリ力を体験することはできない。回転台の上で回りながら重りを前後に動かしてみるによりある程度体験することができる。また実験用の大きな回転室内で床は遠心力を相殺するように曲がっているところで走ってみると横への力を体感する筈であるが、これは少し大がかりとなる。

回転系の特徴を表す現象として西岸強化流と上下の運動が抑制される現象についても述べた。これらをうまく体験する簡単な実験はすぐには思いつかない。後者については大きな回転水槽の中で泳ぐようなことが面白いかもしれない。定量的に検討しなければ分からないが、回転する流体の中では流体の動きが抑制されるので泳ぐのにより力が必要になるのではないかとと思われる。しかし回転に比べゆっくりな運動でないと回転の効果は現れないので、回転を速くするかかなりゆっくりと手足を動かさなければ体感できないとは思

われる。

回転系では他にも様々な特異な現象があり、それらを見せる室内実験もいくつもある。しかし、自分で体感するような実験も必要であろう。現在、計算機の能力、ソフトウェアの大きな発展があり、仮想現実が世の中に沢山ある。この仮想現実は物事の理解の大きな助けとなることは事実であるが、その分、体験することの重みが減っているように思える。このような中で力を体験できるような簡単な実験の必要性は増すであろう。

#### 参考文献

- Durran, D. R., 1993: Is the Coriolis force really responsible for the inertial oscillation? Bull. Amer. Meteor. Soc., 74(11), 2179-2184.
- 戸田盛和、力学、物理入門コース、岩波、1982、244pp.
- Holton, J. R., An Introduction to Dynamic Meteorology, 5th edition, 1992, 511pp.
- 気象力学通論、小倉義光、東京大学出版会、1978、249pp.
- 栗原宣夫、大気力学入門、岩波書店、1979、244pp.



## Simple experiments to bodily sense a rotating system

Kenji Nakamura

Large scale phenomena in the atmosphere or ocean are strongly affected by the Earth rotation. It may be difficult to understand the mechanism of phenomena in the rotating system. The Coriolis' force is one of the examples. Here, we discuss simple experiments which help understanding the apparent forces appear in the rotating system. The experiment is sitting on a turn table with a rotating wheel. Rotating on a turn table and changing the axis of the rotating wheel, we could bodily sense the Coriolis' force, and we may understand the mechanism of the western boundary current in the ocean, etc.